

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04877

研究課題名(和文) パラスト状態にも適用できる任意性を排除した形状影響係数の決定法の確立

研究課題名(英文) Development of objective method for determining form factor under full-load and ballast conditions

研究代表者

岡畑 豪 (OKAHATA, Go)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・准教授

研究者番号：80546169

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、任意性を排除した形状影響係数 $K$ の決定法の開発に取り組んだ。まず、乱流中の平板の摩擦抵抗係数の式を基に、抵抗試験結果に対してフィッティングを行うのに有効な近似関数を作成した。次に、スパースモデリングの手法を取り入れることによって、近似関数を抵抗試験結果に対してフィッティングするプログラムを作成した。さらに、分散の定義に基づいた評価指標を用い、低速域の計測データを取捨選択する手法を開発した。これにより、任意性を含まず、抵抗試験結果から形状影響係数 $K$ を決定することが可能となった。公開されているSRの報告書のデータを用いて検証し、その有効性が確かめられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

模型船の抵抗試験結果から形状影響係数 $K$ を決定する際、これまでは造波抵抗係数を表す式を基にしていたのに対し、本手法は粘性抵抗係数を表す式を基にしている点が学術的に新しい。また、スパースモデリング手法の有用性を示す一例となった。従来の方法では熟練の技術者の経験に頼っていたものが、本手法を用いることによって実務経験年数に関係無く同一の形状影響係数 $K$ を決定することが可能となり、実船の性能推定技術の発展に貢献することができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempted to develop an objective method for determining a form factor under full-load and ballast conditions. First, we created approximate functions based on equations of flat plate frictional resistance coefficient for fitting to the results of resistance tests. Second, we developed computer codes for the curve fitting using sparse modeling and executed them to determine a form factor. And finally, we also developed a procedure for objectively removing the measured data of the slow velocity area by improving the evaluation index. The present method was applied to some SR resistance test data under full-load and ballast conditions. Consequently, it could be found that the proposed method for determining a form factor was effective.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：形状影響係数 抵抗試験 パラスト状態 スパースモデリング

### 1. 研究開始当初の背景

抵抗試験は実船の性能推定を行う上で欠かせない水槽試験の一つである。抵抗試験では模型実験によって得られた全抵抗から造波抵抗成分を分離する必要がある。形状影響係数 $K$ を用いた3次元外挿法が用いられることが多い。3次元外挿法では、模型船の抵抗試験によって得られた全抵抗に対し、未知係数に形状影響係数 $K$ を含む近似関数をフィッティングすることによって $K$ を決定する。このとき従来の方法では、抵抗試験結果から近似関数が理論的に成立する速度域のデータを抽出する必要がある。このデータの取捨選択において経験が必要となる。このような人為的な選択をすること無く、客観的に形状影響係数 $K$ を決定できる任意性を排除した方法は未だ確立されていない。

### 2. 研究の目的

前述の背景を踏まえ、本研究ではバラスト状態でも適用できる任意性を排除した形状影響係数 $K$ の決定法を確立することを目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) 任意性を排除するために、抵抗試験結果を取捨選択する必要が無い近似関数を開発した。まず、乱流中の平板の摩擦抵抗係数を表す式を変形することによって、傾きが形状影響係数 $K$ の関数となる直線を解析的に導いた。この直線は粘性抵抗成分を表す。次に、導いた直線に造波による影響を表す高次のべき級数を加え、全抵抗係数に対する近似関数を作成した。

(2) スパースモデリングの考え方をを用い、最適化問題として定式化を行った。満載状態だけでなくバラスト状態にも対応できるように近似関数の自由度を大きくするために、近似関数のべき級数の項数を多くとった。このため、未知係数が条件数である実験データ数よりも多くなる。そこでスパース性を仮定して、 $s$ -スパース近似による L0 最適化問題、および L1 正則化による L1 最適化問題として定式化を行った。

(3) L0 最適化問題および L1 最適化問題それぞれに対して、最適化計算を行うためのプログラムを C 言語で作成し、数値解析を行った。

(4) 満載状態およびバラスト状態の抵抗試験結果が公開されている SR の試験結果に対して、本手法を用いて解析した結果と SR の報告書に記載されている結果を比較し、本手法の妥当性を検証した。なお、検証のために模型船を用いて回流水槽で抵抗試験を行ったが、その試験結果の信頼性が担保できなかったため、本手法の検証には採用しなかった。

### 4. 研究成果

(1) 開発した近似関数を次式で表す。

$$Y = AX + \sum_{i=k}^n a_i X^i \quad (1)$$

ここで、 $a_i$ は未定係数を表す。また、 $X, Y, A$  に関しては、平板の摩擦抵抗係数の式 $C_F$ に ITTC57 の式や Hughes の式など $C_F = \alpha / (\log_{10} Re - \beta)^{\gamma}$ の形で表される式を用いる場合は、

$$X = \log_{10} Re - \beta, \quad Y = \left(\frac{\alpha}{C_T}\right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad A = \left(\frac{1}{1+K}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2)$$

$C_F$ にカルマン・シェーンヘルの式を用いる場合は、

$$X = W \left( \sqrt{\frac{\kappa^2}{2} Re} \right), \quad Y = \frac{\kappa}{\sqrt{2C_T}}, \quad A = \frac{1}{\sqrt{1+K}} \quad (3)$$

となる。なお、 $Re$ はレイノルズ数、 $C_T$ は全抵抗係数、 $K$ は形状影響係数、 $\kappa$ はカルマン定数、 $W$ は Lambert の  $W$  関数を表す。通常、抵抗試験において国外では ITTC57 の式が、国内においてはカルマン・シェーンヘルの式や Hughes の式が通常用いられており、本研究で開発した近似式は国内外において適用することが可能である。さらに従来法とは異なり、近似式の適用範囲が限定されないため、(1)式はすべての速度域の実験結果に適用可能である。よって、開発した近似関数を用いることによって抵抗試験データを取捨選択する必要がなくなる。

(2) L0 最適化問題に定式化するよりも L1 最適化問題に定式化の方が、形状影響係数 $K$ を決定するための手順が少なく済むことが明らかになった。L0 最適化問題に定式化した場合、適切な結果を得るためには、最も低速な計測点よりもさらに低速な領域に理想的な仮想データセットを人工的に与える必要が生じる。このため、最適な仮想データ数が新たなパラメータとなり、最適な仮想データ数を決定する手順が必要となる。一方、L1 最適化問題に定式化した場合は仮想データ無しで適切な結果を得ることが出来る。これは、L0 最適化では局所的最適解に陥る場合があるため、仮想データを与えることによってそれを防ぐ必要があるのに対し、L1 最適

化では大域的最適解を求めることが出来るためであると考えられる。

(3) 開発した形状影響係数 $K$ の決定手順 (L1 最適化による方法) を以下に示す。

- ① 抵抗試験によって得られた $m$ 個の速度と抵抗値のデータから, (2)式もしくは(3)式で示される $(X, Y)$ のデータセット $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_m, Y_m)$ を作る。
- ② データセットを(1)式に代入して次式を得る。

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{a} \quad (4)$$

ここで  $\mathbf{y}, \Phi, \mathbf{a}$  は次式で表される。

$$\mathbf{y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T \quad (5)$$

$$\mathbf{a} = (A, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n)^T \quad (6)$$

$$\Phi = [\phi_1 \ \phi_k \ \phi_{k+1} \ \dots \ \phi_n] \quad (7)$$

$$\phi_j = (X_1^j, X_2^j, \dots, X_m^j)^T \quad (8)$$

- ③ 反復縮小しきい値アルゴリズム ISTA を用いて次式の目的関数 $f(\mathbf{a})$ を最小化する未知ベクトル $\mathbf{a}$ を決定する。

$$f(\mathbf{a}) = \|\Phi \mathbf{a} - \mathbf{y}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{a}\|_1 \quad (9)$$

ここで,  $\|\cdot\|_2, \|\cdot\|_1$  はそれぞれ L2, L1 ノルムを意味する。L2 ノルムはユークリッドノルムを表し, L1 ノルムはベクトルの要素の絶対値の和を表す。 $\lambda$  は正則化パラメータを表す。

- ④ 正則化パラメータ $\lambda$ を変化させて計算し, 次式で定義した評価指標 $R$ が最小となる場合の $\mathbf{a}$ を採用する。

$$R = \frac{1}{X_m} \left[ \int_0^{X_1} (Y(X) - AX)^2 dX + \sum_{i=2}^m \frac{1}{2} \{ (Y(X_{i-1}) - Y_{i-1})^2 + (Y(X_i) - Y_i)^2 \} (X_i - X_{i-1}) \right] \quad (10)$$

- ⑤ 得られた $\mathbf{a}$ の第1成分から(2)式もしくは(3)式を用いて形状影響係数 $K$ を求める。

(4) 本手法を SR の試験結果に対して適用した結果の一例を図1および図2に示す。図1では, 本手法による解析結果と SR の報告書に記載されている結果がほぼ等しい。図1の様に, 低速域の抵抗試験が適切に行われ, 低速域での計測データが乱流中の平板の摩擦抵抗の式に従う計測データに対しては, 本手法を用いることによって妥当な形状影響係数を推定できる。一方図2では, すべての計測データに対して本手法を適用した結果と SR の報告書の結果は大きく異なるが, 低速域の4点を除いたデータに対して本手法を適用した結果と SR の報告書の結果はほぼ等しい。図2の様に, 低速域の抵抗試験結果が, 流れの層流化や計測誤差の増加などによって乱流中の平板の摩擦抵抗の式から外れたデータとなる場合, それらのデータを解析対称から除外する必要がある。本手法は, 適切に計測されたデータに対して有効であるが, 低速域において誤差が大きいデータが含まれる場合はデータの取捨選択をする必要があることが分かった。高速域のデータに対してはすべての場合においてデータの取捨選択をする必要は無い。

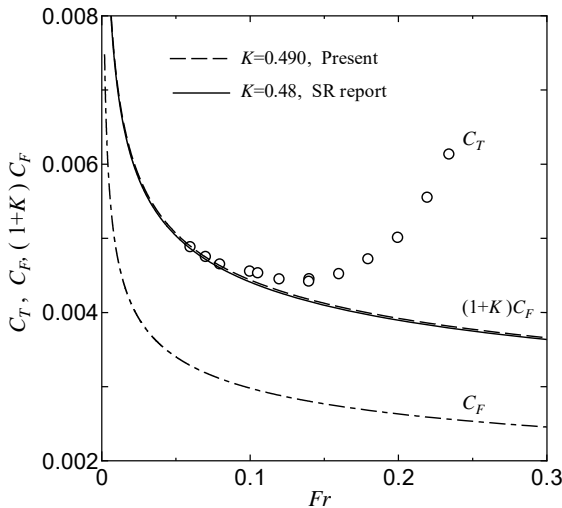


図1 計測値と解析結果 (SR61)

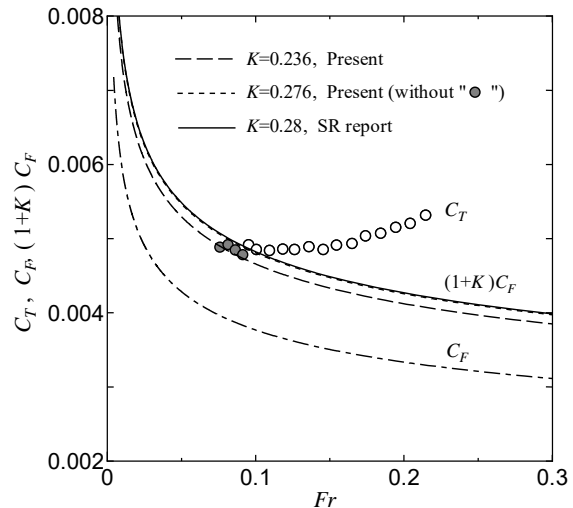


図2 計測値と解析結果 (SR196B)

(5) 本手法を用いても低速域のデータに対して取捨選択が必要であることが明らかになったのため, (10)式の代わりに次式で表される分散の定義に基づいた評価指標 $R$ を用い, 低速域の計測データを低速な方から順番に除外して計算し, 評価指標 $R$ が最小となる場合を採用する方法を開発した。SR の報告書のデータを用いて検証した結果, その有用性が明らかになった。

$$R = \frac{1}{X_m} \int_0^{X_1} (Y(X) - AX)^2 dX + \frac{1}{m} \left( 1 - \frac{X_1}{X_m} \right) \sum_{i=1}^m (Y(X_i) - Y_i)^2 \quad (11)$$

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 岡畑豪, 藪下和樹	4. 巻 29
2. 論文標題 l1正則化による形状影響係数の決定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 213-214
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡畑豪
2. 発表標題 l1正則化による形状影響係数の決定
3. 学会等名 日本船舶工学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藪下 和樹 (YABUSHITA Kazuki) (20546163)	防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・准教授 (82723)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------